

土壤性质对小白菜吸收铬(Cr)的影响及预测模型研究

代允超^{1,2} 吕亚敏¹ 吕家珑^{1,2}

(1. 西北农林科技大学资源环境学院, 陕西杨凌 712100; 2. 农业部植物营养与农业环境重点实验室, 陕西杨凌 712100)

摘要: 采集我国15个省份理化性质差异很大的耕作土壤,利用温室试验,以小白菜为研究对象,通过外源添加铬(Cr),研究Cr从土壤向植物的运移,探索影响Cr生物有效性的主要土壤因素,并建立预测模型。结果表明,土壤总Cr含量、pH值和有机碳(OC)含量对小白菜吸收Cr有显著影响。小白菜Cr含量与土壤Cr含量呈正相关,而与土壤pH值、OC含量呈负相关。相比于土壤总Cr含量的单因素回归分析,将土壤总Cr含量、pH值和有机碳(OC)含量纳入逐步多元线性回归(SMLR)后评价Cr生物有效性时,相关性更高,决定系数由0.861提高到0.927。Cr在酸性土壤中生物富集系数(BCF)较碱性土壤中更大。利用合并CK、Cr1、Cr2处理3个处理的数据($n=45$)得到Freundlich预测方程($R^2=0.927$, RMSE为0.12),较单独使用CK处理数据($R^2=0.572$, RMSE为0.25, $n=15$)和使用Cr1和Cr2处理结合的数据($R^2=0.745$, RMSE为0.17, $n=30$)得出的方程,能更准确地评估Cr在土壤中生物有效性,试验结果可用于预测Cr从土壤到小白菜的转移。

关键词: 铬; 转移特性; 小白菜; 控制因素; 预测模型

中图分类号: S188; S19 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2018)01-0244-07

Influence of Soil Properties on Chromium Uptake of *Brassica chinensis* and Its Prediction Models

DAI Yunchao^{1,2} LÜ Yamin¹ LÜ Jialong^{1,2}

(1. College of Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China

2. Key Laboratory of Plant Nutrition and the Agri-environment in Northwest China, Ministry of Agriculture, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: Estimating heavy metal bioavailability, mobility and transfer is important to environmental and food safety. A greenhouse study was conducted by using *Brassica chinensis* to investigate the movement of chromium (Cr) from soil to plants and predict the main factors influencing Cr bioavailability. The result showed that soil organic carbon (OC) content, pH value and total Cr content had a significant impact on Cr uptake. The plant Cr contents were positively correlated to total soil Cr contents and negatively correlated to soil OC and pH value. Stepwise multiple linear regression (SMLR) (pH value, OC and total soil Cr contents) relationships (R^2 was 0.927) could more accurately estimate Cr bioavailability relative to single-factor (total soil Cr contents) equations (R^2 was 0.861). The maximum bioconcentration factor (BCF) was measured in acidic soils. The most accurate Freundlich equation for estimating Cr bioavailability was developed by using data from combined CK, Cr1 and Cr2 treatments (R^2 was 0.927, RMSE was 0.12, n was 45) compared with the Freundlich equation developed by using the date CK treatment alone (R^2 was 0.572, RMSE was 0.25, n was 15) and using data from only combined Cr1 and Cr2 treatments (R^2 was 0.745, RMSE was 0.17, n was 30). The results can be used to predict Cr transfer from soil to plant systems.

Key words: chromium; transfer characteristics; *Brassica chinensis*; controlling factors; prediction models

收稿日期: 2017-10-26 修回日期: 2017-11-30

基金项目: 农业部公益性行业科研专项(200903015)、“十二五”国家科技支撑计划项目(2015BAD22B02)和陕西省科技创新统筹项目(2016KTZDNY03-01)

作者简介: 代允超(1988—),男,博士生,主要从事土壤环境化学和农业生物环境研究,E-mail: dai_xi_good@126.com

通信作者: 吕家珑(1962—),男,教授,博士生导师,主要从事土壤化学和环境化学研究,E-mail: ljll@nwsuaf.edu.cn

0 引言

铬(Cr)在自然界中存在多种形态,Cr(Ⅲ)是人体必需的元素,而Cr(Ⅵ)具有一定的致癌和致畸作用,由于其在土壤中有较强的溶解性和迁移性,是一种危害性很大的微量重金属元素^[1-2]。蔬菜作为人们日常必不可少的消费品,特别是叶菜类蔬菜对重金属有较强的富集能力,大多数重金属可以通过食用蔬菜很容易进入食物链^[3],中国菜地土壤重金属中以Zn含量最高,其次是Cr,设施菜地的Cu、Cr含量在所有类型中最高^[4],因此蔬菜类土壤的重金属污染问题备受关注。

植物对重金属的吸收量受土壤中重金属含量的直接影响,因此土壤中的金属总含量被中国和欧盟等国家用作制定土壤质量标准的基本指标,但也有研究表明,单独使用重金属总量不足以准确评估重金属的风险,并可能会高估实际风险^[5]。土壤性质如土壤质地、pH值、有机碳(OC)、碳酸钙(CaCO₃)、阳离子交换能量(CEC)、氧化铝(AlO_x)和氧化铁(FeO_x)等都会影响重金属在土壤中的迁移率和生物有效性^[6-8]。在对重金属风险评估时不能仅考虑重金属总量,还应考虑土壤性质对重金属生物有效性的影响^[9]。然而,这些土壤性质之间的相互关系使得影响土壤中Cr生物有效性的主要变量难以确定。因此,可以通过逐步多元线性回归分析

(SMLR),得出相应的回归方程,确定土壤性质和Cr生物有效性之间的关系。

现有关于Cr的生物有效性方面研究的土壤类型多集中在单一土壤或性质相近的土壤中,限制了结果的普遍应用性^[10-13]。中国地域广阔,土壤性质差异很大,在进行土壤Cr生态风险评价时需要考虑不同土壤性质对Cr生物有效性的影响,但目前仍然缺乏在不同种类土壤上普遍适用的评价Cr生物有效性的方法。因此,构建适用于各种土壤类型的预测模型至关重要。本研究评估影响小白菜Cr生物有效性的主要因素,构建小白菜在不同类型土壤上吸收Cr的预测模型,以期对Cr的生物有效性和风险评估提供一定理论依据。

1 材料与方 法

1.1 供试土壤

采集我国15个省份理化性质差异较大的土壤,采样深度为0~20cm,土壤样品风干后过20目尼龙筛,供土壤基本理化性质测定。分析方法参照文献^[14]。土壤样品中Cr含量采用HJ 491—2009《土壤总铬的测定 火焰原子吸收分光光度法》,使用湿酸消解法(HNO₃-HF-HClO₄)对供试土壤样品进行消解处理,浸提液使用原子吸收分光光度计(Hitachi-2000型,日本)测量其中的总Cr含量。供试土壤基本理化性质如表1所示。

表 1 供试土壤基本理化性质
Tab. 1 Properties of selected soil

编号	采样点	pH 值	有机碳 质量比/ (g·kg ⁻¹)	CaCO ₃ 质量比/ (g·kg ⁻¹)	CEC/ (cmol·kg ⁻¹)	粘粒 质量分数/ %	FeO _x 质量比/ (g·kg ⁻¹)	AlO _x 质量比/ (g·kg ⁻¹)	Cr 本底值 质量比/ (mg·kg ⁻¹)
1	湖南	4.90	9.00	0	10.85	42.91	1.71	0.11	49.69
2	重庆	5.74	10.14	0	21.34	24.96	2.14	0.08	31.01
3	云南	5.92	19.87	0	11.10	27.52	1.97	0.26	53.74
4	江西	6.01	6.78	0	8.70	36.51	1.76	0.18	44.81
5	安徽	6.25	11.62	0	19.08	16.84	2.34	0.05	36.96
6	黑龙江	6.27	20.70	0	28.59	19.33	1.96	0.09	54.22
7	吉林	6.82	19.05	0	31.11	30.18	1.84	0.19	35.07
8	陕西	7.90	9.56	35.60	22.37	26.01	1.20	0.17	58.27
9	河南	8.07	10.32	27.50	16.01	18.18	0.94	0.15	50.97
10	新疆	8.12	11.27	15.06	25.25	9.57	1.19	0.19	73.42
11	山西	8.24	13.44	25.15	16.80	17.74	1.10	0.15	52.78
12	天津	8.29	12.77	53.57	24.67	7.59	1.60	0.16	46.26
13	甘肃	8.37	11.18	38.51	11.23	6.66	1.67	0.13	79.17
14	山东	8.65	6.87	31.69	13.09	17.11	0.92	0.16	59.86
15	内蒙古	8.80	9.45	11.51	11.61	10.51	0.72	0.19	66.00

注:土壤编号以pH值为序。

1.2 实验布置和植物样品分析

在陕西省杨凌区进行盆栽实验。按照中国国家

土壤环境质量标准(GB/T 15618—1995),将外源Cr(重铬酸钾K₂Cr₂O₇)以0、150、300mg/kg的标准施

用于含有 1 kg 土壤的盆中。将 Cr 溶解在水中后再喷洒在供试土壤上,以确保混合均匀。将 Cr 处理(对照(CK)、Cr1、Cr2 对应于 0、150、300 mg/kg 的 Cr 施用量),每个处理重复 3 次,自然条件下放置 3 个月使其自然老化。期间土壤含水率保持在最大持水量的 80%,并且每周称量并补水。在土壤老化期后,向每个盆土壤中加入含有 0.30 g N(尿素)、0.10 g P($\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$)和 0.20 g K(K_2SO_4)的基肥。然后将小白菜种子直接播种在盆栽土壤中,发芽后,根据长势每盆定苗 2 株。在整个生长期间土壤含水率都保持在最大持水量的 80%。

生长 60 d 后将小白菜收获,新鲜植物样品用蒸馏水冲洗,鲜样在 105℃ 下杀青 20 min,然后在 70℃ 干燥至恒质量,粉碎过 60 目筛备用。植物样中的 Cr 含量采用 GB/T 5009.123—2003《食品中铬的测定》方法测定,在密封的高压系统下用 $\text{HNO}_3\text{-H}_2\text{O}_2$ 消化。用石墨炉原子吸收光谱仪(日立 Z-2000 型,日本)测量植物样品中的总 Cr 含量。每个样品重复 3 次,用菠菜类标准物质 GBW-10015 作标准参考材料,以确保测试的准确性。

1.3 数据分析

生物富集系数(BCF)是植物样品中金属含量与土壤中金属含量的比值。目前有两种常见的计算生物富集系数的方法。第 1 种为全量法^[15],计算方程式为

$$F_{total} = C_{plant}/C_{soil} \quad (1)$$

式中 F_{total} ——全量法生物富集系数

C_{plant} ——小白菜中 Cr 质量比,mg/kg

C_{soil} ——土壤中 Cr 质量比,mg/kg

第 2 种方法为外源法^[16],计算方程式为

$$F_{added} = (C_{plant-added} - C_{plant-CK}) / (C_{soil-added} - C_{soil-CK}) \quad (2)$$

式中 F_{added} ——外源法生物富集系数

$C_{plant-added}$ ——添加 Cr 处理的小白菜中 Cr 质

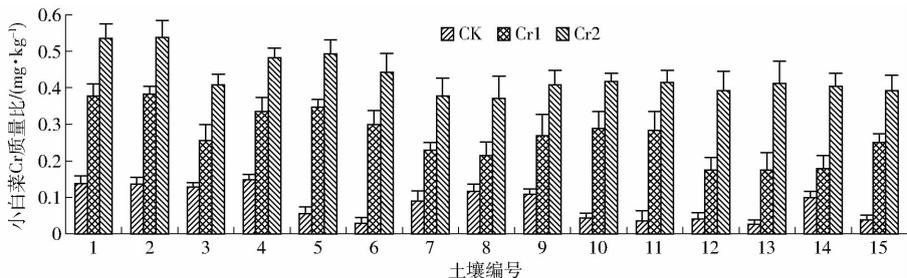


图 1 不同 Cr 处理下小白菜的 Cr 质量比

Fig. 1 Cr concentration in *Brassica chinensis* under different Cr treatments

2.2 土壤性质对小白菜富集 Cr 的影响

如图 3a 所示为用全量法计算的生物富集系数(F_{total}),相比于对照 CK,添加 Cr 的处理 Cr1 和 Cr2

量比,mg/kg

$C_{plant-CK}$ ——对照处理的小白菜中 Cr 质量比,mg/kg

$C_{soil-added}$ ——添加 Cr 处理的土壤中 Cr 质量比,mg/kg

$C_{soil-CK}$ ——对照处理土壤中 Cr 质量比,mg/kg

基于土壤基本理化性质,采用逐步多元线性回归预测小白菜 Cr 吸收。除了 pH 值之外的所有数据在分析之前进行对数转化以获得正态分布,数据分析和作图采用 SPSS 和 Excel 软件。

2 结果与分析

2.1 添加重金属对小白菜 Cr 含量的影响

如图 1 所示,CK、Cr1 和 Cr2 处理中小白菜 Cr 质量比范围分别为 0.026 ~ 0.148 mg/kg,0.175 ~ 0.383 mg/kg 和 0.371 ~ 0.538 mg/kg,平均值分别为 0.082、0.271、0.432 mg/kg。Cr1 和 Cr2 处理中小白菜 Cr 含量均显著高于 CK 处理中小白菜 Cr 含量($P < 0.01$),Cr2 处理中小白菜 Cr 含量又显著高于 Cr1 处理中小白菜 Cr 含量($P < 0.01$)。在酸性土壤(土壤 1~7)中生长的小白菜中 Cr 质量比(0.297 mg/kg)高于在碱性土壤(土壤 8~15)上生长的小白菜中的 Cr 质量比(0.231 mg/kg),这表明低 Cr 在低 pH 值土壤上具有较高的生物有效性。土壤 3 虽然 pH 值较低,但 Cr 的生物有效性较其他酸性土壤却不高,其原因可能是土壤 3 的有机质质量比(19.87 g/kg)较高,降低了 Cr 在土壤中的生物有效性。

如图 2a 所示,小白菜 Cr 含量与土壤 Cr 含量呈显著相关($R^2 = 0.788, P < 0.01$)。土壤中的 Cr 质量比(20.26 ~ 355.59 mg/kg)和小白菜 Cr 质量比(0.026 ~ 0.538 mg/kg)表现出很大的变化。将小白菜 Cr 含量与土壤 Cr 含量对数化处理后,小白菜 Cr 含量和土壤 Cr 含量之间相关性更高($R^2 = 0.861, P < 0.01$)(图 2b)。

显著增加了不同土壤中的生物富集系数(BCF),但 Cr1 和 Cr2 处理之间的差异并不显著。在酸性土壤中 F_{total} 值较高,表明 Cr 在酸性条件下具有较高的生

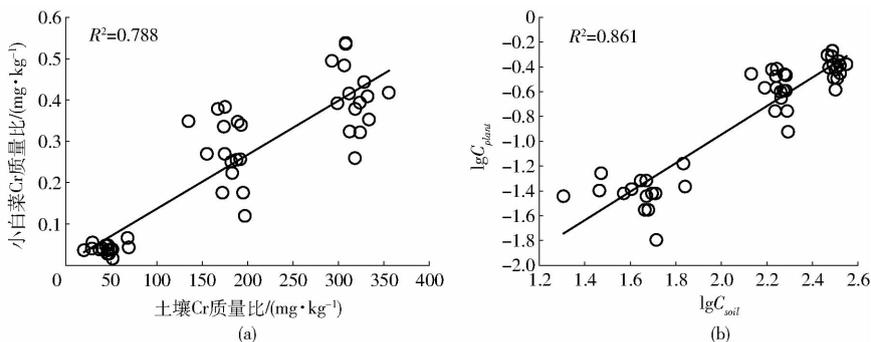


图 2 土壤 Cr 和小白菜 Cr 质量比之间的关系

Fig. 2 Relationships between Cr concentration in *Brassia chinensis* and soil

物有效性。相对于其他酸性土壤, 土壤 3、6、7 的 F_{total} 显著降低, 这可能是由于这 3 种土壤中有有机碳 (OC) 含量较高 (质量比分别为 19.87、20.70、19.05 g/kg)。土壤 12 相对于其他土壤的 F_{total} 显著降低, 这可能是由于该土壤中 $CaCO_3$ 含量较高 (质量比为 53.57 g/kg)。与其他碱性土壤相比, 土壤 14 的 F_{total} 明显较高, 这可能是由于土壤中有有机碳含量较低 (质量比为 6.87 g/kg)。如图 3b 所示, 用外源法计算的生物富集系数 (F_{added}) 变化规律及特征与用全量法计算的生物富集系数 (F_{total}) 相似。另外, 无论是用外源法计算的生物富集系数和用全量法计算的生物富集系数在 Cr1 处理均略高于 Cr2 处理, 其原因可能是虽然 Cr2 处理中植物 Cr 含量较 Cr1 处理高, 但其 Cr2 处理土壤中 Cr 含量也较高, 导致生物富集系数较小, 但两个处理间的生物富集系数并没有表现出显著差异。

2.3 影响小白菜吸收 Cr 的土壤因素

本研究通过简单回归分析和逐步多元线性回归分析对植物中 Cr 含量和土壤中 Cr 含量之间的关系进行分析, 由结果可以看出, 基于土壤 Cr 含量的单因素预测方程估计精度最低 ($lg C_{plant} = 1.15lg C_{soil} - 3.25, R^2 = 0.861, P < 0.01$), 基于土壤 Cr 含量和土

壤 pH 值的双因素方程估计精度有所提高 ($lg C_{plant} = 2.14lg C_{soil} - 0.23C_{H^+} + 0.15, R^2 = 0.896, P < 0.01$, C_{H^+} 为土壤 pH 值), 而基于土壤 Cr 含量, 土壤 pH 值和土壤 OC 含量的三因素方程估计精度最高 ($lg C_{plant} = 2.68lg C_{soil} - 0.13C_{H^+} - 0.25lg C_{OC} - 1.62, R^2 = 0.927, P < 0.01, C_{OC}$ 为土壤有机碳质量比), 可以看出, 将土壤性质纳入逐步多元线性回归分析改进了 Cr 生物有效性的估计。其他土壤性质如粘粒含量、CEC、 $CaCO_3$ 含量、Fe-或 Al-氧化物含量均未显著提高方程的精度, 因此没有被回归到预测方程中。小白菜 Cr 含量与土壤 pH 值及 OC 之间的简单关系如图 4 所示。

2.4 从土壤到小白菜的 Cr 转移预测

Freundlich 方程可用于预测重金属从土壤到植物系统转移^[17-19], 其方程式为

$$lg C_{plant} = a + b lg C_{soil} \quad (3)$$

式中 a, b ——常数

相对于单因素 (土壤 Cr 含量) 模型, 添加 pH 值、OC、CEC 和粘粒含量等土壤性质后的模型, 可以提高 Freundlich 方程的相关系数。对数转换的 Freundlich 模型经常被应用于研究各种土壤-植物系统中的重金属吸收。

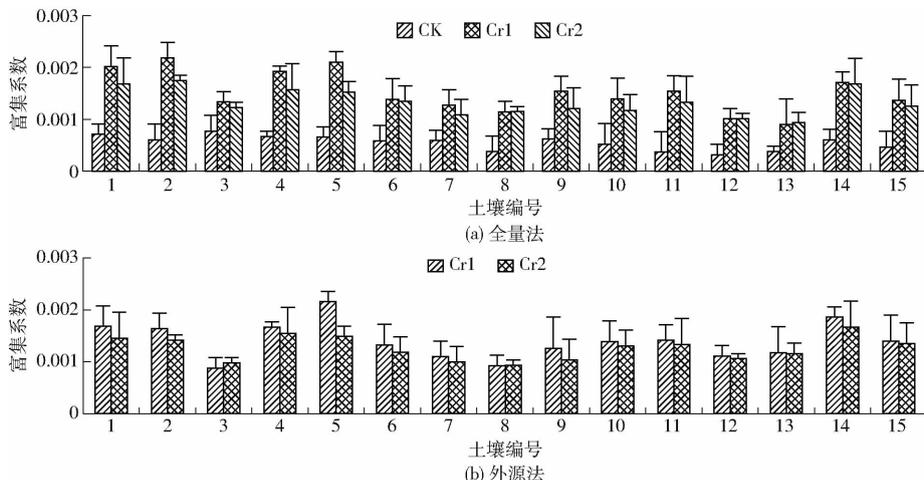


图 3 不同 Cr 处理下 15 种土壤中小白菜的生物富集系数

Fig. 3 F_{total} and F_{added} of *Brassia chinensis* in 15 soils under different Cr treatments

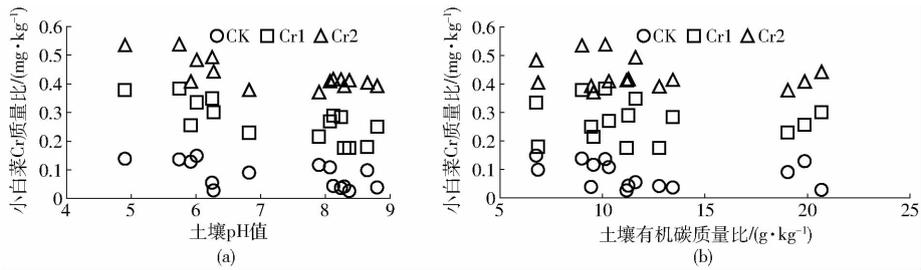


图4 小白菜 Cr 质量比与土壤 pH 值、土壤 OC 含量之间的简单关系

Fig. 4 Simple relationships between Cr concentration in *Brassia chinensis*, soil pH value and OC in soils

可以通过预测值和实测值之间的均方根误差 (RMSE) 和决定系数 (R^2) 来获得最佳预测方程, RMSE 越小, R^2 越大, 其方程预测效果最好。在本研究中, 基于方程 (3), 根据不同来源的 Cr 数据, 分别是对照法 (CK)、全量法 (Cr1、Cr2)、外源法 (Cr1 - CK、Cr2 - CK) 和利用合并 CK、Cr1、Cr2 3 个处理数据的方法, 对预测方程进行计算, 共得到 4 个不同方

程, 如表 2 所示。由表 2 可以看出, 小白菜 Cr 含量与土壤 Cr 含量呈正相关, 但与 pH 值和有机碳含量呈负相关。通过绘制不同 Cr 来源的预测值和实测值之间的关系图 (图 5) 可以看出, 通过合并对照和 Cr 处理计算的回归方程预测效果最好 ($R^2 = 0.927$, RMSE 为 0.12)。

表 2 基于不同数据源的小白菜 Cr 吸收的预测方程

Tab. 2 Prediction equations for different Cr sources

Cr 处理	回归方程	R^2	P	n
对照法 (CK)	$\lg C_{plant} = 1.86 \lg C_{soil} - 0.23 C_{H^+} - 0.14 \lg C_{OC} - 0.11$	0.572	< 0.01	15
全量法 (Cr1、Cr2)	$\lg C_{plant} = 2.47 \lg C_{soil} - 0.08 C_{H^+} - 0.33 \lg C_{OC} + 1.05$	0.745	< 0.01	30
外源法 (Cr1 - CK、Cr2 - CK)	$\lg C_{plant} = 1.62 \lg C_{soil} - 0.17 C_{H^+} - 0.29 \lg C_{OC} + 0.67$	0.698	< 0.05	30
合并法 (CK、Cr1、Cr2)	$\lg C_{plant} = 2.68 \lg C_{soil} - 0.13 C_{H^+} - 0.25 \lg C_{OC} - 1.62$	0.927	< 0.01	45

注: n 为处理数。

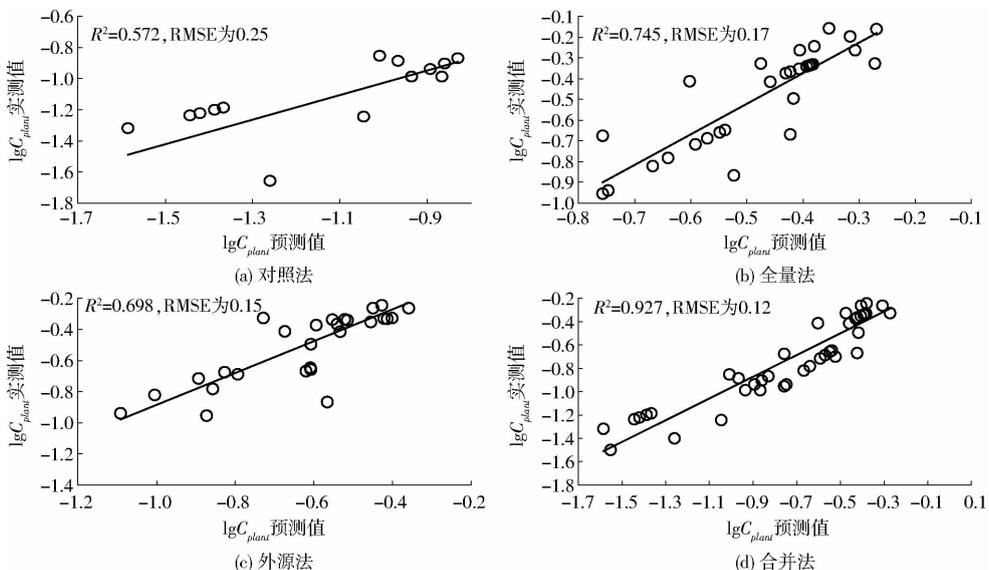


图5 不同数据来源的小白菜 Cr 测定和预测值之间的关系

Fig. 5 Relationships between measured $\lg C_{plant}$ and predicted $\lg C_{plant}$ of different Cr sources

3 讨论

通过小白菜 Cr 含量和土壤 Cr 含量之间的简单线性回归分析可以看出, 随着土壤 Cr 添加量的增加, 小白菜中的 Cr 含量也随之增加, 说明两者之间存在正相关关系 ($R^2 = 0.788$), 将数据进行对数处

理后, 小白菜 Cr 含量和土壤 Cr 含量之间相关性有所提高 ($R^2 = 0.861$, $P < 0.01$) (图 2a、2b), 其原因可能是对数化处理后, 提高了数据间方差变异的同质性, 其他的研究也有类似的报道^[20-22]。

通过逐步多元线性回归分析 (SMLR) 所构建的方程可以看出, 小白菜中 Cr 含量和土壤中 Cr 含量

呈正相关,但和土壤 OC 含量和土壤 pH 值呈负相关。土壤 pH 值控制重金属在土壤固相中的沉淀、溶解以及金属的吸附解吸、络合和酸碱反应等^[23]。因此,土壤 pH 值对土壤中 Cr 的形态有直接的影响。本研究证实,在酸性土壤中的小白菜 Cr 含量和生物富集系数都较大,表明 Cr 在酸性土壤上具有很高的生物有效性,其他研究也有类似的结论^[24]。土壤有机质含量也与 Cr 的生物有效性呈负相关,原因可能是土壤中有有机大分子与重金属离子发生络合反应,生成不能被小白菜利用的有机物大分子,从而降低了小白菜对 Cr 的吸收^[25],有机物料腐解后产生的某些基团能有效吸附、络合土壤重金属,从而减少重金属的生物有效性^[26]。另外,有报道称有机物料施用还能改变土壤中重金属的形态^[27]。通过对比逐步多元回归分析和简单线性回归分析可以看出,植物 Cr 含量和土壤 Cr 含量之间的简单线性回归分析不能完全反映出土壤性质对 Cr 生物有效性的影响,在评价 Cr 的生物有效性时,将土壤理化性质纳入回归方程可以提高方程的相关性,评价效果更好,说明土壤性质(OC 含量、pH 值)对小白菜从土壤中吸收 Cr 有显著影响。在这方面,许多学者都进行了相关研究^[16,21-22,28],本研究的土壤来源更加广泛,具有更强的现实意义。

目前用于评价重金属生物有效性的模型主要有经验模型和机理模型,机理模型通常基于土壤参数(如土壤溶液中离子的扩散系数)和植物特征(如根大小和几何形状,根的离子吸收的动力学参数),其评价体系较为繁琐^[29-30]。由于经验模型更简单和准确,近年来很多研究人员使用经验模型预测重金属的生物有效性^[22,28]。例如,FRANCOIS 等^[31]研究指出,经验模型比机理模型预测小麦中的重金属浓度更准确,这是由于经验模型考虑了土壤 pH 值、CEC 和土壤重金属的活性等因素。宋文恩等^[32]研究水稻中镉的生物有效性时利用经验模型获得的预

测方程,可以解释模型变异的 81.9% 以上。DING 等^[33]利用经验模型研究根菜类蔬菜铅的生物有效性时获得的预测方程,可以解释模型变异的 93% 以上。Freundlich 型方程通常基于容易测量的土壤性质参数而得出,比如 pH 值、OC、CEC 和重金属总量等,已经被广泛用于评估重金属从土壤到植物转移特征^[34]。

本研究分别用对照法(CK)、全量法(Cr1、Cr2)、外源法(Cr1 - CK、Cr2 - CK)和合并法(CK、Cr1、Cr2)对预测方程进行计算,共得到 4 个不同方程,各方法得到的预测方程预测效果都较好,但合并法得到的方程预测效果最好,实测值和预测值相关性最高($R^2 = 0.927$, RMSE 为 0.12)。另外,本研究中 15 个不同土壤基本理化性质的变化范围比较大,特别是 pH 值和有机碳含量,以确保这些变量在回归模型中的意义。本研究得到的预测模型可以为中国土壤 Cr 污染对叶菜类蔬菜的生态风险评价和土壤环境质量标准的修订提供参考。

4 结论

(1)小白菜中 Cr 含量与土壤中 Cr 含量呈正相关,与土壤 OC 含量和 pH 值呈负相关,Cr 在酸性土壤中富集系数比碱性土壤大,植物 Cr 含量和土壤 Cr 含量的关系在经过对数处理后,其相关性更好。

(2)相对于单因素(土壤 Cr 含量)模型,通过逐步多元线性回归得到的多因素(土壤 pH 值、OC 和土壤 Cr 含量)预测模型的相关性更好,决定系数 R^2 由 0.861 提高到 0.927。

(3)利用合并 CK、Cr1、Cr2 处理 3 个处理的数据得到的 Freundlich 预测方程($R^2 = 0.927$, RMSE 为 0.12),较单独使用 CK 处理数据($n = 15$)和使用 Cr1 和 Cr2 处理数据($n = 30$)得出的方程,能更准确地评估 Cr 在土壤中生物有效性,可以用于估计 Cr 从土壤到小白菜的转移。

参 考 文 献

- 1 宋波,高定,陈同斌,等.北京市菜地土壤和蔬菜铬含量及其健康风险评估[J].环境科学学报,2006,26(10):1707-1715. SONG Bo, GAO Ding, CHEN Tongbin, et al. A survey of chromium concentrations in vegetables and soils in Beijing and the potential risks to human health[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2006, 26(10): 1707-1715. (in Chinese)
- 2 王敬哲,塔西甫拉提·特依拜,张东.基于分数阶微分的荒漠土壤铬含量高光谱检测[J/OL].农业机械学报,2017,48(5):152-158. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170518&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2017.05.018. WANG Jingzhe, TASHPOLAT·Tiyip, ZHANG Dong. Spectral detection of chromium content in desert soil based on fractional differential[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(5): 152-158. (in Chinese)
- 3 贾夏,董岁明,周春娟.土壤低含量铅时冬小麦幼苗根际微生物群落的变化[J/OL].农业机械学报,2013,44(2):103-108. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20130220&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2013.02.020. JIA Xia, DONG Suiming, ZHOU Chunjuan. Changes of microbial communities in rhizosphere of winter wheat seedlings under low lead content[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(2): 103-108. (in Chinese)
- 4 曾希柏,李莲芳,梅旭荣.中国蔬菜土壤重金属含量及来源分析[J].中国农业科学,2007,40(11):2507-2517. ZENG Xibai, LI Lianfang, MEI Xurong. Heavy metal content in soils of vegetable-growing lands in China and source analysis[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2007, 40(11): 2507-2517. (in Chinese)

- 5 BRAND E, LIJZEN J, PEIJNENBURG W, et al. Possibilities of implementation of bioavailability methods for organic contaminants in the Dutch soil quality assessment framework[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2013, 261: 833 – 839.
- 6 ALLUE J, GARCÉS A M, BECH J, et al. Fractionation of chromium in tannery sludge-amended soil and its availability to fenugreek plants[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2014, 14(4): 697 – 702.
- 7 MCLAUGHLIN M J, SMOLDERS E, DEGRYSE F, et al. Uptake of metals from soil into vegetables[M]//SWARTJES F. *Dealing with contaminated sites*. Dordrecht:Springer Netherlands, 2011: 325 – 367.
- 8 ZENG F, ALI S, ZHANG H, et al. The influence of pH and organic matter content in paddy soil on heavy metal availability and their uptake by rice plants[J]. *Environmental Pollution*, 2011, 159(1): 84 – 91.
- 9 MALANDRINO M, ABOLLINO O, BUOSO S, et al. Accumulation of heavy metals from contaminated soil to plants and evaluation of soil remediation by vermiculite[J]. *Chemosphere*, 2011, 82(2): 169 – 178.
- 10 DAVIS R D, CARLTON-SMITH C. *Crops as indicators of the significance of contamination of soil by heavy metals* [R]. Stevenage, London: Water Research Centre TR140, 1980.
- 11 郑向群,郑顺安,李晓辰. 叶菜类蔬菜土壤铬(Ⅲ)污染阈值研究[J]. *环境科学学报*, 2012, 32(12): 3039 – 3044.
ZHENG Xiangqun, ZHENG Shun'an, LI Xiaochen. Pollution threshold value of soil chromium (Ⅲ) for leafy vegetables[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2012, 32(12): 3039 – 3044. (in Chinese)
- 12 赵鲁,李旭军,穆真,等. Cr(Ⅲ)胁迫对大豆、小麦生长及铬吸收和转运的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2015(1):63 – 67.
ZHAO Lu, LI Xujun, MU Zhen, et al. Effect of chromium stress on the growth and uptake characteristics of chromium in soybean and wheat[J]. *Soil and Fertilizer Sciences*, 2015(1):63 – 67. (in Chinese)
- 13 赵明,赵征宇,蔡葵,等. 神、铬胁迫对蔬菜生长性状及产品安全性的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2007, 26(增刊2): 489 – 493.
ZHAO Ming, ZHAO Zhengyu, CAI Kui, et al. Effects of As and Cr on the vegetable growth of characteristics and products safety [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(Supp.2): 489 – 493. (in Chinese)
- 14 鲁如坤. *土壤农业化学分析方法* [M]. 北京:中国农业科技出版社, 2000.
- 15 ALLOWAY B J, JACKSON A P, MORGAN H. The accumulation of cadmium by vegetables grown on soils contaminated from a variety of sources[J]. *Science of the Total Environment*, 1990, 91: 223 – 236.
- 16 LIANG Z, DING Q, WEI D, et al. Major controlling factors and predictions for cadmium transfer from the soil into spinach plants [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2013, 93: 180 – 185.
- 17 EFROYMSON R A, SAMPLE B E, SUTER G W. Uptake of inorganic chemicals from soil by plant leaves: regressions of field data[J]. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 2001, 20(11): 2561 – 2571.
- 18 KRAUSS M, WILCKE W, KOBZA J, et al. Predicting heavy metal transfer from soil to plant: potential use of Freundlich - type functions[J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2002, 165(1): 3 – 8.
- 19 SAUVE S, HENDERSHOT W, ALLEN H E. Solid-solution partitioning of metals in contaminated soils: dependence on pH, total metal burden, and organic matter[J]. *Environmental Science & Technology*, 2000, 34(7): 1125 – 1131.
- 20 WEBSTER R. Statistics to support soil research and their presentation[J]. *European Journal of Soil Science*, 2001, 52(2): 331 – 340.
- 21 王卫,梁振飞,李菊梅,等. 土壤性质对烟草中镉富集的影响及预测模型研究[J]. *土壤*, 2014, 46(1): 178 – 183.
WANG Wei, LIANG Zhenfei, LI Jumei, et al. Studies on effects of soil properties on Cd accumulation in tobacco and prediction model[J]. *Soils*, 2014, 46(1): 178 – 183. (in Chinese)
- 22 DING C, LI X, ZHANG T, et al. Phytotoxicity and accumulation of chromium in carrot plants and the derivation of soil thresholds for Chinese soils[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2014, 108: 179 – 186.
- 23 赵智,唐泽军,杨凯,等. PAM与粉煤灰改良沙土中重金属的迁移和富集规律[J/OL]. *农业机械学报*, 2013, 44(7): 83 – 89. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20130716&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2013.07.016.
- 24 ZHAO Zhi, TANG Zejun, YANG Kai, et al. Metal transportation and accumulation in sandy soil amended by fly ash and PAM [J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2013, 44(7): 83 – 89. (in Chinese)
- 25 HAN F X, SU Y, SRIDHAR B B M, et al. Distribution, transformation and bioavailability of trivalent and hexavalent chromium in contaminated soil[J]. *Plant and Soil*, 2004, 265(1): 243 – 252.
- 26 ZENG F, ALI S, ZHANG H, et al. The influence of pH and organic matter content in paddy soil on heavy metal availability and their uptake by rice plants[J]. *Environmental Pollution*, 2011, 159(1): 84 – 91.
- 27 卜贵军,于静,邸慧慧,等. 鸡粪堆肥有机物演化对重金属生物有效性影响研究[J]. *环境科学*, 2014, 35(11): 4352 – 4358.
BU Guijun, YU Jing, DI Huihui, et al. Influence of organic matter evolution during composting on the bioavailability of heavy metals[J]. *Environmental Science*, 2014, 35(11): 4352 – 4358. (in Chinese)
- 28 刘琼峰,李明德,段建南,等. 农田土壤铅、镉含量影响因素地理加权回归模型分析[J]. *农业工程学报*, 2013, 29(3): 225 – 234, 300.
LIU Qiongfang, LI Mingde, DUAN Jiannan, et al. Analysis on influence factors of soil Pb and Cd in agricultural soil of Changsha suburb based on geographically weighted regression model[J]. *Transactions of the CSAE*, 2013, 29(3): 225 – 234,300. (in Chinese)
- 29 LIU K, LÜ J, HE W X, et al. Major factors influencing cadmium uptake from the soil into wheat plants[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2015, 113: 207 – 213.
- 30 BARBER S A. Soil nutrient bioavailability: a mechanistic approach[J]. *European Journal of Soil Science*, 1996, 47(1): 145.
- 31 RENGEL Z. Mechanistic simulation models of nutrient uptake: a review[J]. *Plant and Soil*, 1993, 152(2): 161 – 173.
- 32 FRANCOIS M, GRANT C, LAMBERT R, et al. Prediction of cadmium and zinc concentration in wheat grain from soils affected by the application of phosphate fertilizers varying in Cd concentration[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2009, 83(2): 125 – 133.
- 33 宋文恩,陈世宝. 基于水稻根伸长的不同土壤中镉(Cd)毒性阈值(EC_x)及预测模型[J]. *中国农业科学*, 2014, 47(17): 3434 – 3443.
SONG Wen'en, CHEN Shibao. The toxicity thresholds (EC_x) of cadmium (Cd) to rice cultivars as determined by root-elongation tests in soils and its predicted models[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2014, 47(17): 3434 – 3443. (in Chinese)
- 34 DING C, LI X, ZHANG T, et al. Transfer model of lead in soil-carrot (*Daucus carota* L.) system and food safety thresholds in soil[J]. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 2015, 34(9): 2078 – 2086.
- 35 MENCH M, BAIZE D, MOCQUOT B. Cadmium availability to wheat in five soil series from the Yonne district, Burgundy, France[J]. *Environmental Pollution*, 1997, 95(1): 93 – 103.